

TP6 SPECTROMETRIE

PRESENTATION

Sujet

Compréhension du fonctionnement d'un spectromètre compact à CCD. Utilisation du spectromètre pour réaliser la caractérisation d'un filtre interférentiel.

Objectifs

- Connaître le fonctionnement d'un spectromètre à réseau fixe.
- Obtenir un spectre de qualité.
- Exploiter des spectres pour mesurer les paramètres d'un filtre interférentiel.

Consignes et sécurité

- Le dossier « **Pour le TP S3** » sur le bureau du PC regroupe les icônes utiles.
- **Les fichiers utiles SERONT sauvegardés exclusivement dans « E:/MesDocs »**
- **Les fichiers de documentations sont disponibles dans « E:/MesDocs »**
- **En fin de TP**, penser à arrêter **TOUS** les appareils.
- **Attention à ne pas tordre la fibre optique du spectromètre.**
- Faites particulièrement attention aux filtres et aux composants en verres (pas de chutes, pas de chocs !)
- Faire aussi attention aux lampes spectrales. Eclairer vers le mur pour ne pas éblouir.

Plan du TP

- 1- Fonctionnement d'un spectromètre compact à CCD p 2
- 2- Caractérisation d'un filtre interférentiel par spectrométrie : utilisation sous incidence **normale** p 4
- 3- Caractérisation d'un filtre interférentiel par spectrométrie : utilisation sous incidence **oblique** p 5

Annexes :

- A1- Liste du matériel utilisé p 7
- A2- Logiciel B&WSpec 3.26 p 8
- A3- Table de longueurs d'onde de référence pour étalonnage p 11
- A4- Données pour le CCD Sony ILX511 p 12
- A5- Caractérisation d'un filtre interférentiel p 13
- A6- Photos montrant le positionnement et l'usage du matériel p 16

0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

La documentation et le texte du TP6 en couleur **avec ses annexes complètes** sont sur la page des TP d'optique S3 accessible par <http://mpsn.free.fr>

- Etudier en détail l'Annexe 5.

Q0- Lire §5.4- p15. Après avoir rappelé la relation de Descartes pour la réfraction (i, r), **démontrer en**

détail la relation $\sin i = n \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda^*}{\lambda_0}\right)^2}$ quelque soit l'ordre k du filtre interférentiel.

- Traiter les questions Q1.1a à Q1.1d à l'aide des fichiers de documentation disponibles en ligne.

1- FONCTIONNEMENT D'UN SPECTROMETRE COMPACT A CCD

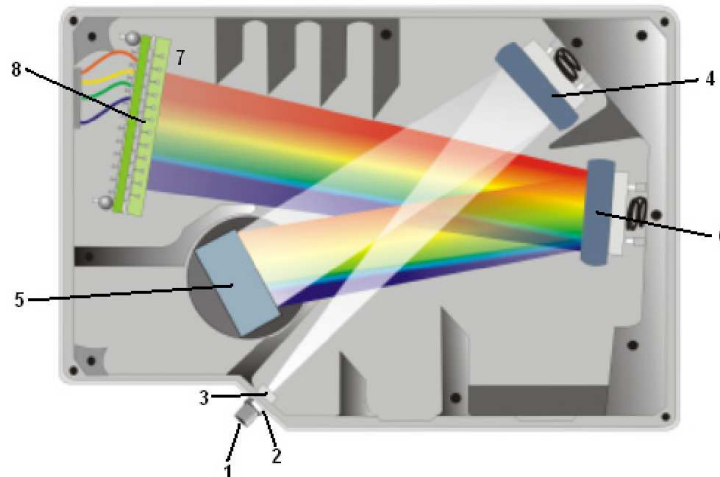
1.1- Configuration de l'instrument

Il existe principalement deux types de configuration :

- Pour un **monochromateur**, la lumière à étudier est dispersée par un réseau en rotation et on construit le spectre en analysant successivement dans le temps les quantités de lumière pour une succession d'éléments spectraux $\Delta\lambda$ sur un unique détecteur (photomultiplicateur, photodiode...).
- Pour un **spectrographe**, l'ensemble des lumières dispersées par le réseau est analysé globalement par un « récepteur d'image » qui permet d'obtenir un spectre en une seule exposition. Les pixels du récepteur numérique CCD ou CMOS, au contraire des grains d'argent du film photographique, permettent une acquisition rapide d'un signal électronique.

Configuration dite de « Czerny-Turner croisée » :

Dans cette configuration, la lumière à analyser, collectée par une **fibre optique**, est introduite dans le spectromètre en (1), au travers d'une **fente** (2) et d'un **filtre optique** (3). Le faisceau est réfléchi sur le **réseau** (5) par un **miroir courbe de collimation** (4) destiné à élaborer un faisceau quasi-parallèle. Le faisceau issu du réseau dont les couleurs sont maintenant « **dispersées** » est renvoyé par un second **miroir courbe de focalisation** (6) sur le **capteur d'image** (8) dont chacun des **pixels** recevra la lumière d'un élément spectral $\Delta\lambda$ distinct et élaborera une réponse numérique après conditionnement et conversion. Le capteur inclut souvent un système de lentille (7) optimisant la collecte du flux sur les pixels.



Utiliser les notices pdf disponibles (dont celles du spectromètre BRC112E-V03 et du CCD ILX511).

Q1.1a- Quels sont les termes anglais pour : ouverture, fente, filtre, miroir, réseau, lentille ?

Q1.1b- Identifier pour le spectromètre BRC112E-V03 les valeurs des paramètres :

- Largeur de la fente d'entrée
- Résolution spectrale
- Nombre de traits/mm du réseau
- Nombre de bits du CAN intégré au capteur d'image (résolution numérique)
- Nombre et dimensions des pixels du CCD ILX511

Q1.1c- Pourquoi faut-il a priori collimer le faisceau sur le réseau et pourquoi doit-on le faire dans cette configuration ?

Q1.1d- Quelle doit être la nature du filtre optique d'entrée sachant que le spectromètre est conçu pour « travailler » au premier ordre du réseau et seulement dans le visible ?

Acquisition d'un spectre :

Le **cycle d'acquisition** est réglé dans le logiciel. Il consiste donc à éclairer le capteur pendant une **durée d'exposition** à choisir (« integration time ») afin de ne pas saturer le détecteur, puis à faire un **cycle de lecture/conversion** des pixels, à **transmettre ces données** au PC par la liaison USB et les **traiter** afin de tracer le **spectre** en fonction de la longueur d'onde λ .

Le spectromètre a été **étalonné par comparaison**. Il est alimenté électriquement par la liaison USB.

1.2- Prise en main du système et acquisition d'un premier spectre

Prise en main du logiciel B&WSpec



- Exécuter le logiciel B&Wspec.
- L'Annexe A2- propose un « guide rapide ». Voir pour les détails « BWSpec 3.26 User Manual.pdf » [B&WS p 7, 8, 10, 11]. Le sommaire de ce pdf permet un accès direct aux pages désirées.



Obtention d'un premier spectre : LED blanche


- Tout d'abord, **vérifier la résolution et le cas échéant rétablir la meilleure résolution** du système par le **mode 2048 pixels** avec le menu « Setup/Pixel Monitoring Mode ».

- Placer l'extrémité de la fibre optique à 10 cm environ de la LED blanche ou alors en sortie du collimateur. Faire briller la LED (le module d'alimentation branché en bout de banc inclut une résistance limitant l'intensité à 15 mA environ).


- Vérifier que la case « Dark Compensate » est bien décochée.

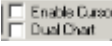
-  ou  Régler l'axe des X en « Wavelength (nm) » sur la plage 400 nm/750 nm.

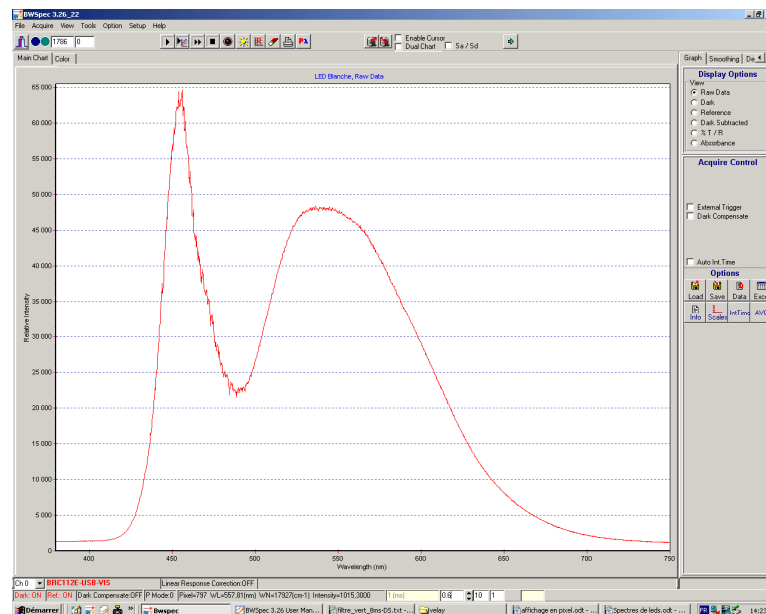
-  Acquérir avec rafraîchissement en phase de réglage puis en mode simple. 

-  Régler la durée d'exposition afin de ne pas saturer le détecteur. Le plus simple ensuite est d'utiliser le réglage direct accessible dans la barre des messages.

- Opter pour le mode d'affichage « Raw Data » qui donne en Y les données « brutes ».

-  Visualiser les données. Constaté le nombre de valeurs. Revenir au graphe en cliquant sur l'onglet « Color » puis sur l'onglet « Main Chart ».

-  Cocher « Enable Cursor » permet de faire des lectures directes en nm ou en pixel sur le spectre. Les valeurs des coordonnées sont disponibles dans la barre des messages.



Q1.2a- Obtenir un spectre convenable avec λ en abscisse, l'imprimer puis l'annoter à la main.

Q1.2b- Donner les coordonnées du maximum avec le curseur. Quelle est la couleur associée ?

Q1.2c- Quelle est la plage de valeurs disponibles pour Y en mode « Raw Data » ? La valeur particulière correspondant à la saturation d'un pixel est-elle compatible avec les paramètres identifiés en Q1.1b- ?


Q1.2d- Par quelle méthode passe-t-on, selon vous, de mesures réalisées pixel par pixel (abscisse du spectre affichée en « px ») à un affichage pratique où on lit une longueur d'onde en abscisse ?

1.3- Etalonnage du spectromètre

Etalonner ?

« Etalonner » veut concrètement dire ici : « éclairer le spectromètre avec une **lumière dont la longueur d'onde est connue** (raie d'une lampe spectrale, raie LASER...) et noter la valeur mesurée proposée par le système qui correspond au **maximum de la raie** ».

Techniques expérimentales

- Mettre en marche la lampe spectrale utile 2 mn avant la mesure.
La lampe **éclaire en direction du mur** pour ne pas éblouir.
Arrêter la lampe dès la fin de la mesure d'étalonnage.
- **Positionner la fibre optique du spectromètre SANS trop la courber (demander).**
- Si la durée d'exposition nécessaire était trop courte pour les valeurs disponibles dans le logiciel, il suffit d'éloigner l'entrée de la fibre (> 20 cm ?) ou encore de l'éclairer avec un angle d'incidence non nul !
- Pour une **raie grande mais non saturée**, relever soigneusement avec le curseur la valeur centrale de la longueur d'onde λ_{mes} . Il est aussi possible d'utiliser la feuille regroupant les données tracées (« onglet data »  Data).

Réalisation de l'étalonnage-vérification

Voir les photographies du montage [cf. A6.1-]

*Q1.3a- Faire un **étalonnage** pour **trois raies** visibles correspondant à peu près aux valeurs centrales des filtres jaune, vert et bleu disponibles en salle de TP. Choisir judicieusement les raies à mesurer parmi celles des spectres des lampes spectrales Hélium, Mercure et Sodium mises à votre disposition (les **valeurs de références** sont en Annexe A3-). Expliquer votre choix.*

Q1.3b- Compléter votre tableau d'étalonnage en calculant les écarts de justesse entre λ_{ref} et λ_{mes} . Analyser et commenter.

2- CARACTERISATION D'UN FILTRE INTERFERENTIEL


Utilisation du filtre interférentiel JAUNE sous incidence NORMALE

Préréglage du montage :

Voir les photographies du montage [cf. A6.2- et A6.3-]

- Le spectre de la LED blanche émet une quantité suffisante de lumière jaune pour servir d'éclairage de référence afin d'obtenir la fonction de transmission du filtre.
- Le **collimateur** est réglé pour que le faisceau produit soit quasiment parallèle pour assurer un angle d'incidence homogène à chaque étape des mesures.
- **Prérégler** soigneusement l'angle de la platine de rotation à 0°. Identifier sur la photo le **réglaage de largeur** (1), le **blocage** (2) et le **réglaage fin** (3) sur la photo [A6.2-].
- Positionner le matériel afin que le filtre puisse tourner sans gêne de 45° et régler soigneusement les **alignements** en hauteur et en largeur.

2.1- Obtention de la courbe de transmission du filtre interférentiel :

*Q2.1a- En absence de filtre, obtenir un spectre de la lumière de la LED, en limite inférieure de saturation. En faire une **acquisition de Référence** (menu « Acquire/Acquire Reference » ou ). Vérifier en affichant le spectre de référence.*

*Q2.1b- En absence de filtre et LED éteinte, faire une **acquisition de noir** avec la même durée d'exposition (menu « Acquire/Acquire Dark » ou ).*

*Q2.1c- Mettre le filtre en place **le plus perpendiculairement possible** (vu de dessus) au banc avec la platine réglée à 0°.*

Expliquer clairement comment vous vous y prenez pour rechercher la perpendicularité de façon fine.

Q2.1d- Faire une acquisition du signal filtré pour la même durée d'exposition. Visualiser le signal filtré sans correction (affichage « Raw Data ») et avec correction de noir (affichage « Dark Sustracted »). Expliquer le principe de la correction de noir. Evaluer cette correction (ne pas hésiter à changer temporairement l'échelle d'affichage en ordonnée pour justifier son propos). La correction du « noir » est-elle indispensable ?

*Q2.1e- Afficher la courbe de transmission par le **mode %T/R**. Imprimer cette courbe de transmission.*

2.2- Analyse de la courbe de transmission du filtre interférentiel :

*Q2.2a- Indiquer clairement à quoi correspond la « courbe de transmission » T affichée par le logiciel. Justifier vos affirmations en analysant **précisément** et quantitativement certaines des données numériques de lignes pertinentes disponibles dans la feuille de calcul interne associée aux graphes (onglet « Data »*



Data »). Penser à examiner la nature de la correction de noir.

Q2.2b- Quelle caractéristique générale présente qualitativement le filtre étudié ? (une étude quantitative est réalisée au §2.3)

Q2.2c- Analyser la réponse spectrale du détecteur CCD [A4]. En quoi la procédure utilisée pour réaliser la courbe de transmission T est-elle a priori « auto-correctée » du fait que la réponse spectrale du CCD est non constante ?

Q2.2d- Réaliser une autre courbe de transmission en remplaçant le signal de sortie du filtre par un second signal de noir et l'imprimer. Expliquer clairement la courbe obtenue en considérant la qualité de la correction de noir. Faire le lien avec votre courbe de transmission du filtre étudiée au §2.1e.

2.3- Exploitation de la courbe de transmission du filtre interférentiel :

- Exploiter les **procédures de calcul indiquées dans l'annexe A5-**.

*Q2.3a- Rechercher le maximum sur la courbe et mesurer la **longueur d'onde centrale du filtre** λ_0 et la **transmission maximale** T_{\max} en %.*

*Q2.3b- Rechercher aux curseurs sur l'écran la « **pleine largeur à mi-hauteur** » $\delta\lambda$.*

Q2.3c- Doubler l'évaluation de ces grandeurs à partir du graphe imprimé.

*Q2.3d- Déduire de ces mesures les valeurs du **pouvoir de résolution PR**, du **facteur M** et enfin du **facteur de réflexion moyen R**. Commenter.*

3- CARACTERISATION D'UN FILTRE INTERFERENTIEL

Utilisation du filtre interférentiel JAUNE sous incidence OBLIQUE

Procédure expérimentale :

Voir les photographies du montage [cf. A6.4-]

- Afin d'améliorer la sensibilité de la mesure, parce que la réponse du CCD varie peu sur la largeur $\delta\lambda$ ainsi que le bruit de noir, faire la recherche des maxima λ^* sur la réponse « Raw Data ».
- Augmenter la durée d'exposition afin d'obtenir un spectre optimal en incidence nulle (en prévision de la diminution de T_{\max} en cours de rotation).
- Chaque position oblique du filtre sera obtenue en deux temps : d'abord débloquer la rotation (2), ajuster la valeur voulue et bloquer à nouveau, puis affiner le réglage avec la seconde vis (3).
- En cours de rotation, il peut être nécessaire de translater le filtre latéralement pour recentrer le faisceau.
- Mesurer les coordonnées du maximum sur l'écran avec les curseurs après avoir restreint la plage affichée.

3.1- Réalisation des mesures :

On constate expérimentalement qu'en augmentant l'angle d'incidence, la courbe de transmission se décale et que le maximum diminue (axe des « x » : λ).

Q3.1- Réaliser une série de mesures de la longueur d'onde λ^ du maximum pour une série d'angle d'incidence i . Une progression de 0° à 40° par pas de 5° est envisageable (justifier).*

3.2- Exploitation des mesures :

Q3.2a- Exploiter le modèle théorique obtenu en travail préparatoire (Q0-) $\sin(i) = n \times \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda^}{\lambda_0}\right)^2}$*

dans un classeur « FI_XY.ods » enregistré dans E:\MesDocs.

Q3.2b- En déduire une première valeur de l'indice n de la couche centrale du filtre ainsi que l'épaisseur e de cette couche. Il s'agit de l'épaisseur minimale de la couche car on considère l'ordre 1 du réseau. Commenter.

Q3.2c- La relation attendue devrait a priori se présenter sous la forme d'une « droite expérimentale » pourvu que l'on considère les deux changements « naturels et d'ailleurs évidents » suggérés par la formule précédente.

De ce point de vue, évaluer la qualité de vos mesures à l'aide d'indicateurs statistiques fourni par le tableur.

Q3.2d- Que pensez-vous en particulier de la qualité de vos mesures aux faibles valeurs de l'angle i ? Améliorez la qualité de votre ajustement linéaire en cherchant la valeur optimale du paramètre i_0 dans le

modèle amélioré suivant : $\sin(i - i_0) = n \times \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda^}{\lambda_0}\right)^2}$*

Que vaut votre valeur optimale de i_0 ? Que représente physiquement ce paramètre ? Sa valeur est-elle plausible ?

Calculer enfin une valeur affinée pour l'indice n et l'épaisseur e estimés à la question Q3.2b- .

ANNEXES

ANNEXE A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE

Matériel utilisé

- un spectromètre B&WTEK BRC112E-V03 (distribution EDMUND), son raccord USB
- une fibre optique spécifique de liaison, support spécifique pour fibre, pied « demi-lune » pour table et cavalier pour banc

- un banc optique de 2 m
- lampes spectrales Hélium He, Mercure Hg et Sodium Na (variante Oxygène O₂ ?)
- LED blanche, son alimentation et son cavalier
- collimateur et cavalier (tp focométrie)
- platine de rotation graduée sur cavalier spécifique
- série de trois filtres interférentiels sur support bois

- un classeur avec texte de TP et Annexes

Matériel informatique et logiciels utilisés











- un ordinateur PC « OPTIQUE 8 » win XP, avec logiciels BWSpec 3.26 et tableur Open Office CALC
- sur le « bureau » du PC, un dossier « tp6 doc étudiant » contenant :
 - documentation pour le logiciel BWSpec 3.26 (pdf)
 - documentation spectroscopie BRC112E V03 B&WTECK pour Edmund (pdf)
 - documentation sur la configuration des spectromètres « Czerny-Turner croisé » (pdf)
 - documentation sur le CCD du spectromètre, SONY ILX511 (pdf)

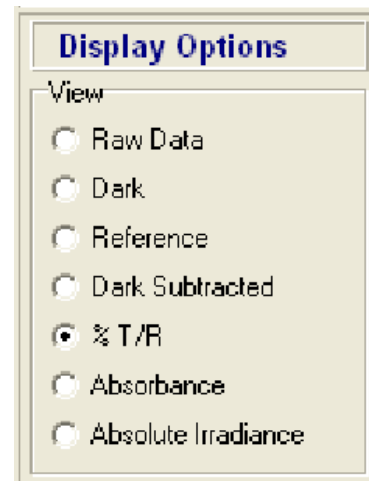
- accès à l'imprimante réseau

ANNEXE A2- : LOGICIEL B&WSPEC 3.26

A2.1- Barre d'outils



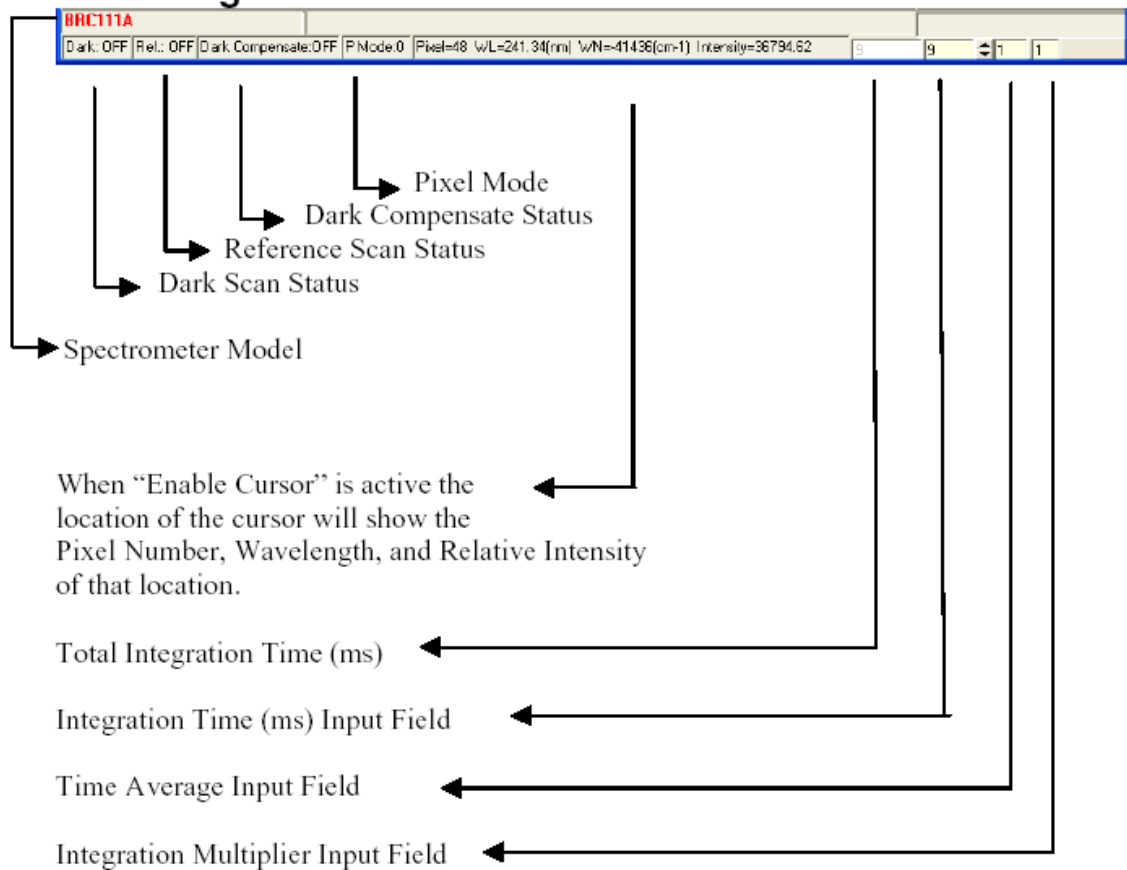
-  Exit BWSpec 3.26 Program.
-  Acquire One Spectrum.
-  Acquire Spectrum Overlay
-  Acquire Spectra Continuously
-  Stop Acquisition
-  Acquire Dark Scan
-  Acquire Reference Scan
-  Reset Graph to X and Y scale default settings
-  Print Current Spectrum
-  Change X-axis units



A2.2- Options d'affichage (display option)

- **Raw Data:** View Raw Data allows spectral data to be plotted in the main chart without involving Dark Subtractions or Data Conversions.
- **Dark:** View Dark displays the saved Dark Spectrum.
- **Reference:** View Reference displays the saved Reference Spectrum.
- **Dark Subtracted:** View Dark Subtracted displays the spectrum with the Dark Spectrum data subtracted from the current spectral data.
- **%TR:** View %TR displays the normalized spectral curve by using the saved Reference Spectrum and saved Dark Spectrum.
- **Absorbance:** View Absorbance displays spectral data in absorbance units.
- **Absolute Irradiance:** View Absolute Irradiance displays absolute irradiance corrected spectrum. This option is only available when the "Response Correction" is enabled from the Menu Bar under "Acquire" and "Enable Correction" is check marked in the Response Correction window.

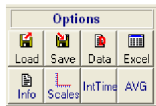
A2.3- Barre de messages





When “Enable Cursor” is active the location of the cursor will show the Pixel Number, Wavelength, and Relative Intensity of that location.


Notes: Total Integration Time= Integration Time * Integration Multiplier

A2.4- Panneau des options



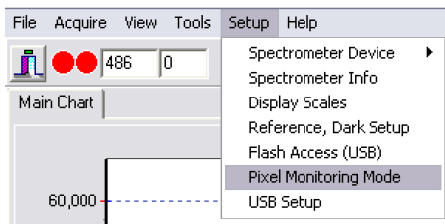
- 

Displays current spectrum (DARK, REF, %TR, etc.) in a data table format. Select “View” from the menu bar and select “Spectrum” to return to spectrum view.
- 

Displays the scale setting for the graph. Here the users can adjust the length of the X-axis in pixels or Wavelength (nm) and Y-axis in Intensity. The X-axis scale can also be set to Pixels or Wavelength (nm), Wavelength (cm⁻¹), Raman Shift (cm⁻¹) or Wavelength (nm) (Integer) where the intervals between WL may be set.
- 

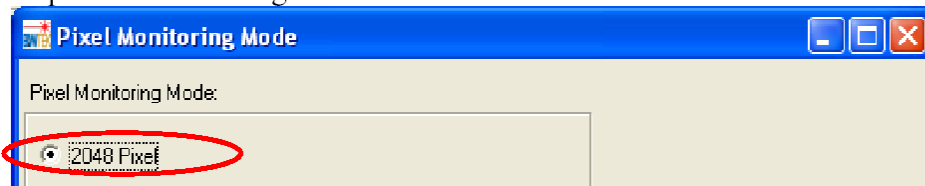
Displays the “Integration Time Set” window which allows the user to adjust the integrating time in ms.

A2.5- Modes de sélection des pixels



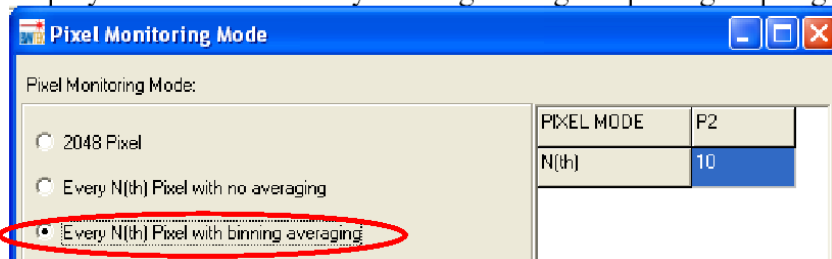
Parmi les 8 modes disponibles, utiliser :

- (a) **2048 Pixels or 512 Pixels:** This is the default readout mode which allows for all CCD pixels to be readout and displayed. The number of pixels will depend on the spectrometer configuration.



Soit 2048 pixels pour ce spectromètre.

- (c) **Every N(th) Pixel with binning averaging:** In this mode the user may select CCD pixels to be readout every nth pixels as specified in the dialog box. Binning average will be performed over the pixel groups of 0, 1, 2, ... (n-1). The spectral display will be the intensity binning average of pixel groups against pixel groups.



Prendre par exemple N = 8

On dispose alors de $2048 / 8 = 256$ lignes de données disponibles à l'export, ce qui est largement suffisant pour l'étude d'un spectre en pleine bande.

ANNEXE A3- : TABLE DE LONGUEURS D'ONDES DE REFERENCES

Principales raies visibles des spectres des éléments

Source de lumière	Longueur d'onde (en nm)	Couleur et observation
Hélium He (dans l'air)	706,519	rouge
	667,815	rouge
	587,562	orangée
	501,568	vert
Sodium Na (dans l'air)	589.00	doublet jaune non résolu
	589.59	
Mercure Hg (dans l'air)	576.960	doublet jaune résolu
	579.066	
	546.074	vert
	435.833	indigo
	404.656	violet

Sources :

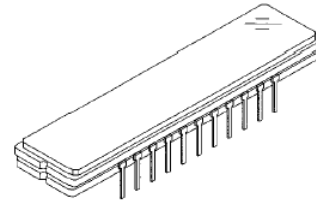
- Handbook of Chemistry and Physics – 76th edition – CRC Press

SONY **ILX511**

ANNEXE A4- : 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W)

Description

The ILX511 is a rectangular reduction-type CCD linear image sensor designed for bar code POS hand scanner and optical measuring equipment use. A built-in timing generator and clock drivers ensure single 5V power supply for easy use.



Features

- Number of effective pixels: 2048 pixels
- Pixel size: 14µm x 200µm (14µm pitch)
- Single 5V power supply
- Ultra-high sensitivity
- Built-in timing generator and clock-drivers

- Built-in sample-and-hold circuit
- Maximum clock frequency: 2MHz

Absolute Maximum Ratings

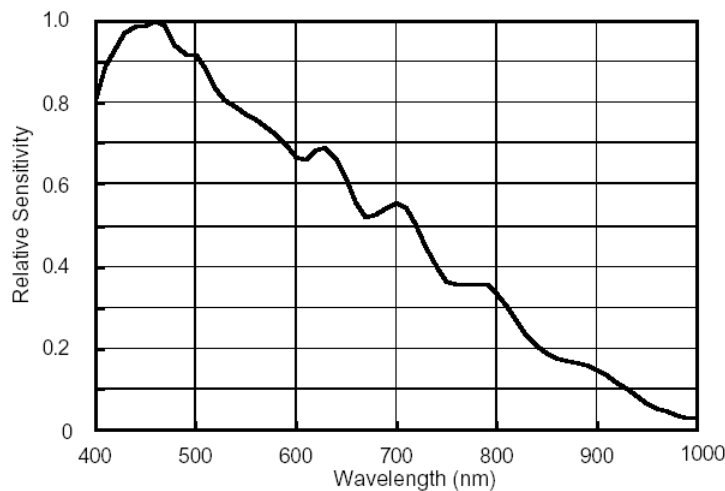
- Supply voltage VDD 6 V
- Operating temperature -10 to +60 °C
- Storage temperature -30 to +80 °C

Electro-optical Characteristics

(Ta = +25°C, VDD = 5V, Clock Frequency: 1MHz, Light Source = 3200K, IR Cut Filter: CM-500S (t = 1.0mm), Without S/H Mode)

Item	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Remarks
Sensitivity 1	R1	150	200	250	V/(lx · s)	Note 1
Sensitivity 2	R2	—	1800	—	V/(lx · s)	Note 2
Sensitivity nonuniformity	PRNU	—	5.0	10.0	%	Note 3
Saturation output voltage	VSAT	0.6	0.8	—	V	—
Dark voltage average	VDRK	—	3.0	6.0	mV	Note 4
Dark signal nonuniformity	DSNU	—	6.0	12.0	mV	Note 4
Image lag	IL	—	1	—	%	Note 5
Dynamic range	DR	—	267	—	—	Note 6
Saturation exposure	SE	—	0.004	—	lx · s	Note 7
5V current consumption	I VDD	—	5.0	10.0	mA	—
Total transfer efficiency	TTE	92.0	98.0	—	%	—
Output impedance	Zo	—	250	—	Ω	—
Offset level	Vos	—	2.8	—	V	Note 8

Spectral Sensitivity (typ.) (Ta = +25°C)



ANNEXE A5- : CARACTERISATION D'UN FILTRE INTERFERENTIEL

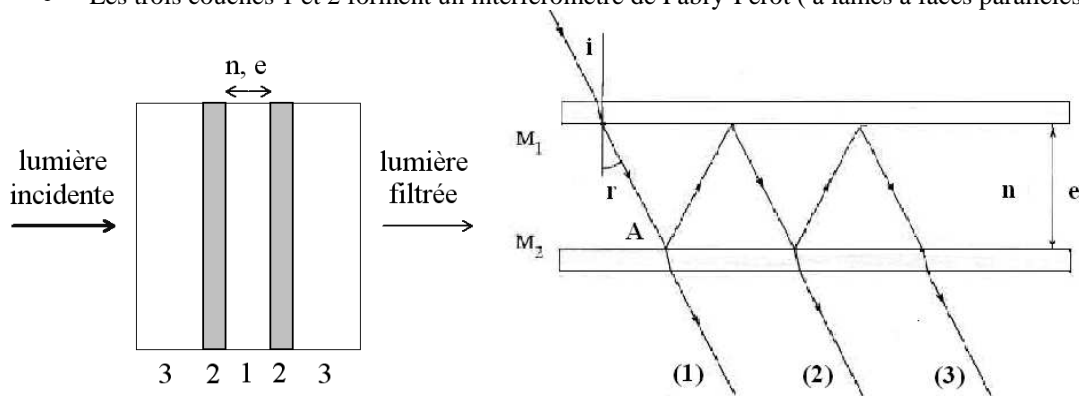
Conception et calcul des paramètres significatifs

A5.1- Description

Un filtre interférentiel est un dispositif qui utilise le phénomène d'interférences pour ne laisser passer qu'une bande spectrale étroite du rayonnement incident.

Ce composant est appelé « MDM filter » en anglais (pour Metal/Dielectric/Metal), ce qui décrit assez bien le dispositif :

- La couche 1 est réalisée avec un diélectrique qui est un matériau isolant **d'indice de réfraction n** dont **l'épaisseur e** doit être bien maîtrisée. D'indice optique assez grand, il s'agit par exemple d'une résine époxy chargée par une proportion ajustée d'un oxyde ou d'un sulfure métallique (TiO_2 , ZnS , Sb_2S_3 ...)
- Les deux couches 2 sont réfléchissantes et doivent se comporter comme de bons miroirs. Elles peuvent être réalisées par un dépôt métallique (d'où le M) ou encore un empilement spécial de couches diélectriques d'indice alternativement élevé et faible qui se révèle être très réfléchissant. Le facteur de réflexion R est proche de 1.
- Ces couches très fines sont déposées sur des lames de verre 3, formant « sandwich », qui assure rigidité et protection.
- Les trois couches 1 et 2 forment un interféromètre de Fabry-Perot (à lames à faces parallèles).



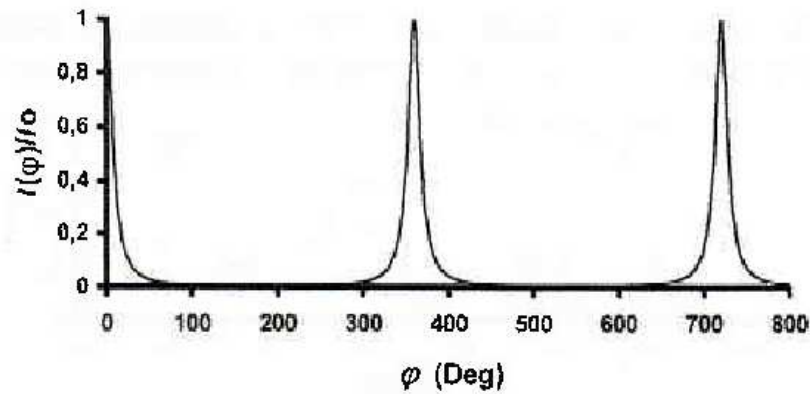
Comme le montre la seconde figure, le faisceau incident est partiellement transmis à la suite d'une succession de réflexions et transmissions multiples ; les différentes ondes transmises étant susceptibles d'interférer selon le déphasage introduit par les différences de chemins optiques parcourus.

A5.2- Intensité transmise par le filtre interférentiel

En supposant que les deux couches réfléchissantes sont très fines et donc n'absorbent pas d'énergie, l'intensité I transmise par le filtre interférentiel peut être mise sous la forme :

$$I(\varphi) = \frac{I_0}{1 + M \sin^2\left(\frac{\varphi + \varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)} \quad \text{avec} \quad M = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad \text{et} \quad \varphi = 2\pi \times \frac{2ne \cos r}{\lambda}$$

- R_1 et R_2 sont les facteurs de réflexion énergétique interne sur les couches réfléchissantes M_1 et M_2 ; $R = \sqrt{R_1 R_2}$ est le facteur de réflexion moyen. Les facteurs de transmissions sont $T_1 = 1 - R_1$ et $T_2 = 1 - R_2$.
- Les déphasages φ_1 et φ_2 sont introduits par les réflexions sur les couches réfléchissantes, leur somme peut être supposée nulle par la suite.
- I_0 est l'intensité maximale de la lumière transmise
- r est l'angle de réfraction de la lumière dans la couche mince transparente 1 d'indice n , pour un angle d'incidence i .
- λ est la longueur d'onde du rayonnement considéré



La fonction I admet des maxima pour $\varphi + \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi = 2k\pi$ selon l'hypothèse précédente. Cela correspond à la condition d'interférences constructives.

$$\varphi = \frac{2\pi \times 2ne \cos r}{\lambda} = k2\pi \quad \text{d'où} \quad \lambda = \frac{2ne \cos r}{k} \quad \text{où } k \text{ est l'ordre de transmission du filtre.}$$

Les filtres sont généralement conçus pour « travailler » avec $k = 1$ car cela permet de prendre la couche la plus fine pour une longueur d'onde transmise.

De plus, si le maximum de transmission du filtre pour $k = 1$ est prévu pour être dans le visible (400 nm/750 nm), ceux pour $k \geq 2$ seront alors dans l'ultraviolet (400/k nm; 750/k nm)

On suppose par la suite $k = 1$

A5.3- Utilisation du filtre sous incidence normale

CWL λ_0 (“Center Wave Length” pour « longueur d'onde centrale ») est lue au maximum constaté sur la courbe de transmission.

La longueur d'onde centrale de la bande transmise est donc $\lambda_0 = 2ne/k$ soit $\lambda_0 = 2ne$ si $k = 1$ (en incidence normale $r = i = 0$ et donc $\cos r = 1$)

FWHM $\delta\lambda$ (« Full Width at Half Maximum » pour “Largeur à mi-hauteur”)

Le signal mesuré est proportionnel au flux reçu, c'est à dire à la puissance optique reçue. Le critère usuel pour définir la bande passante est la plage de valeur où la puissance reçue est supérieure à la demi-puissance maximale (au centre de la bande). On cherche donc la **largeur à mi-hauteur** sur la courbe de transmission où on lit $\delta\lambda$.

Dispersion $D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{2\pi \times 2ne}{k\lambda} \right) = -\frac{2\pi \times 2ne}{k\lambda^2} \approx \left| \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda} \right|$

* **Calcul de $\delta\varphi$** : on raisonne autour de $\varphi = 0$ en posant $\varphi' = \delta\varphi/2$ (la courbe est symétrique) phase pour laquelle $I = I_0/2$ ($\delta\varphi/2$ est la demi bande passante en phase). On a :

$$I(\varphi) = I' = \frac{I_0}{2} = \frac{I_0}{1 + M \sin^2 \left(\frac{\delta\varphi}{2} \times \frac{1}{2} \right)} \quad \text{d'où} \quad \delta\varphi = \frac{4}{\sqrt{M}} \quad (\sin a \approx a \text{ car } a \text{ est petit})$$

* **Calcul de $\delta\lambda$** $\Delta\lambda \approx \frac{\delta\varphi}{D_\varphi} \approx \frac{4}{\sqrt{M}} \frac{\lambda^2}{2\pi \times 2ne} \approx \frac{2\lambda_0}{\sqrt{M}\pi}$ car on remplace $\lambda \approx \lambda_0$.

Pouvoir de résolution $PR = k \frac{\lambda_0}{\delta\lambda} \approx k \frac{\sqrt{M} \pi}{2}$ se calcule connaissant λ_0 et $\delta\lambda$

* **Calcul du facteur M** $M \approx \left(\frac{2 \lambda_0}{\pi \delta\lambda} \right)^2$ à l'ordre $k = 1$ se calcule connaissant λ_0 et $\delta\lambda$

Facteur de réflexion moyen R

* **Calcul de R** : En utilisant la définition de M on montre que $R = \frac{2}{M} + 1 - 2 \sqrt{\frac{1}{M^2} + \frac{1}{M}}$ puis on calcule R avec la valeur obtenue pour M. R devrait être proche de 1, mais par valeur inférieure (pourquoi ?).

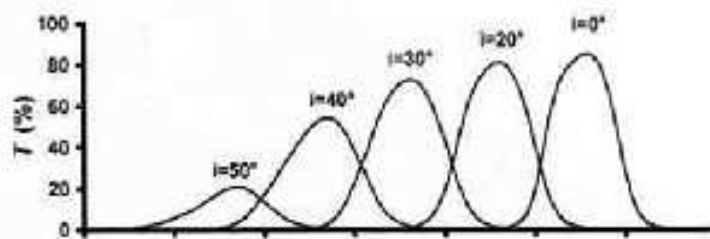
A5.4- Utilisation du filtre sous incidence oblique

De façon générale sous incidence i , on a la longueur d'onde centrale $\lambda^* = \frac{2ne \cos r}{k}$

Mais on a aussi $\lambda_0 = \frac{2ne}{k}$ pour l'incidence normale puisque $r = 0$

* Après avoir rappelé la relation de Descartes pour la réfraction (i , r), on démontre (cf. Q0-) que :

$\sin i = n \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda^*}{\lambda_0} \right)^2}$ quelque soit l'ordre k du filtre interférentiel.



On constate effectivement expérimentalement qu'en changeant l'angle d'incidence, la courbe de transmission se décale et que le maximum λ^* diminue (axe des « x » : lambda).

* **Calcul de n** : les mesures pour différents angles i permettent d'exploiter la relation précédente : la pente de la droite expérimentale que l'on peut tracer donne l'indice n cherché.

* **Calcul de l'épaisseur e** : on tire l'épaisseur de la couche centrale des valeurs de n et $\lambda_0 = 2 n e / k$

Remarque : le fait que le tracé de cette droite expérimentale passe par l'origine permet de valider l'hypothèse faite précédemment que la somme $\varphi_1 + \varphi_2$ est supposée nulle.

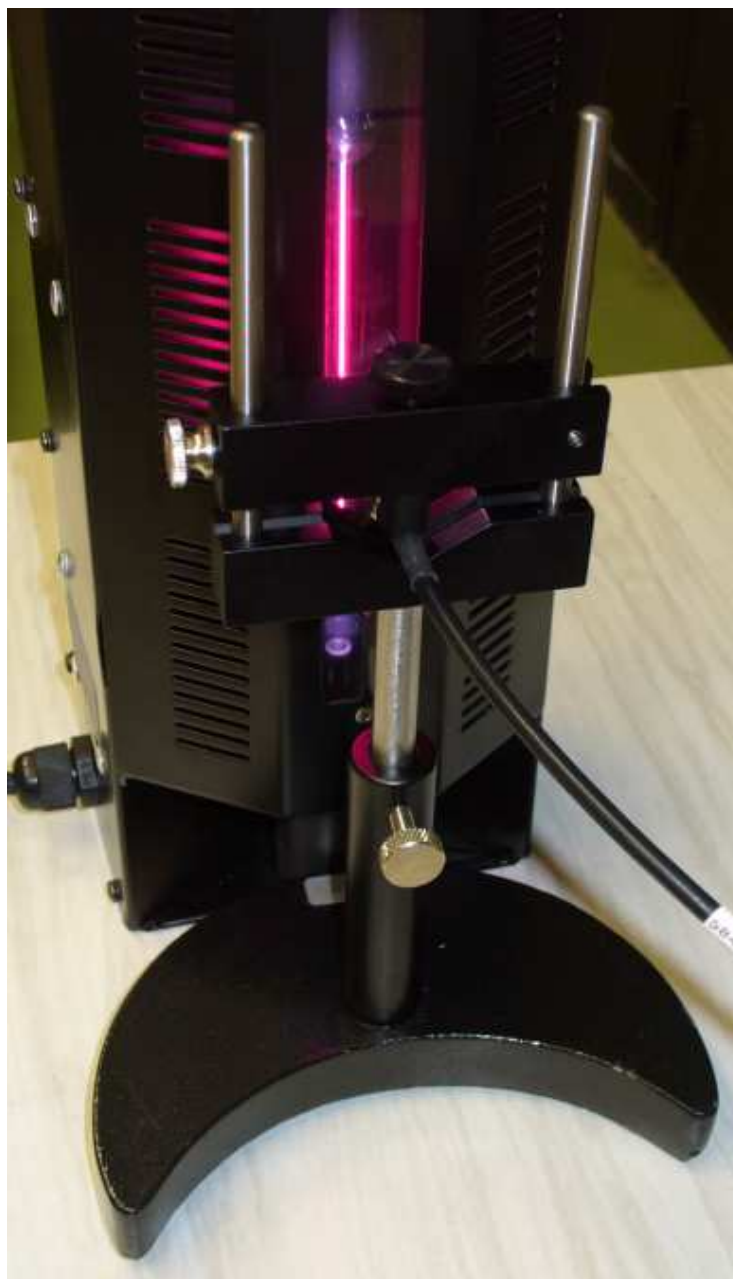
ANNEXE A6- : POSITIONNEMENT ET USAGE DU MATERIEL

A6.1- Etalonnage du spectromètre (cf. 1.3-)

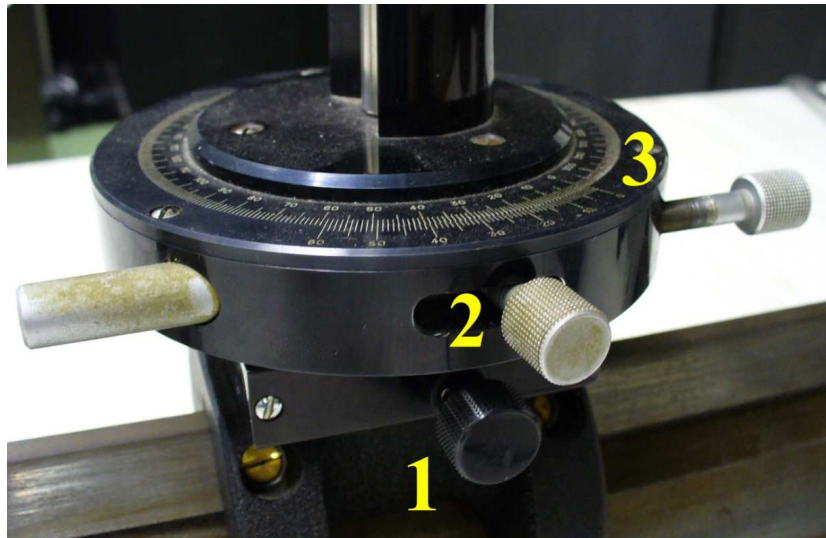
Lumière des lampes spectrales

Une lampe spectrale doit préchauffer 2 minutes avant une mesure. **La couper de suite** après a mesure

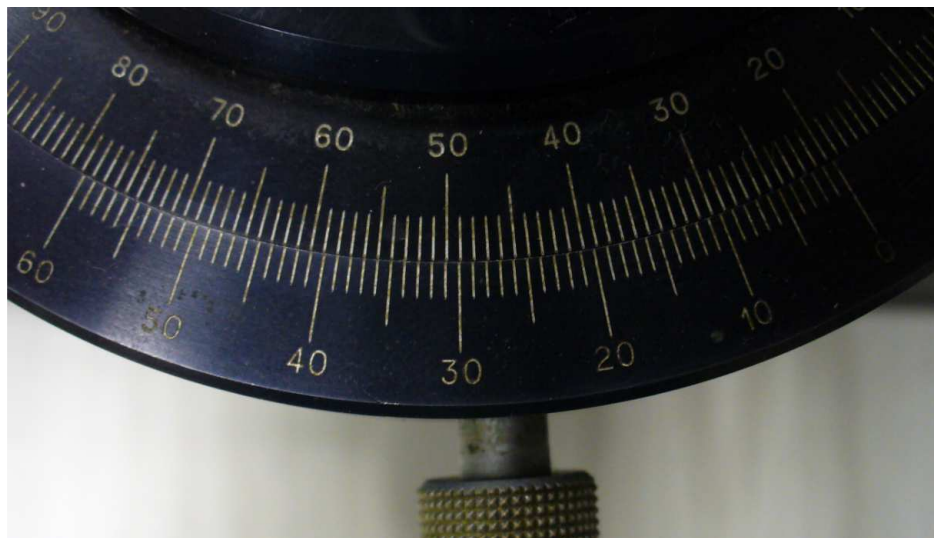
Test des lampes spectrales



A6.2- Réglage et lecture de l'angle de rotation de la platine



- Le réglage de la **translation transversale (1)** permet une correction de l'alignement
- La bague de **blocage (2)** doit être serrée pour pouvoir utiliser le réglage fin (3). Desserrée, elle permet un réglage rapide.
- La course du **réglage fin (3)** est insuffisante pour obtenir une rotation complète de la platine.
- Pour une rotation de plusieurs dizaines de degré, il faut procéder en plusieurs étapes :
 - Bloquer (2) et faire une rotation de la platine en vissant (3)
 - Débloquer (2) pour pouvoir dévisser (3) qui tourne alors « à vide » : on regagne ainsi « de la course » sur la vis (3)
 - Rebloquer (2) et reprendre la rotation de la platine avec (3).
 - Procéder de même pour une rotation en sens inverse.



La lecture de l'angle de rotation se fait en deux temps sur une échelle en degré sexagésimaux (60 minutes d'angle dans un degré !)

- Le nombre de degré se lit au niveau du « 0 » du vernier à 60 graduations. Ici on est un peu avant la graduation 20, soit 19°
- On recherche la graduation du vernier alignée avec la graduation principale pour lire le nombre de minutes d'angle. Ici on lit 35 minutes, soit pour l'exemple : $19^\circ 35'$

A6.3- Etude du filtre interférentiel en incidence normale (cf. 2.1-)

Alignement en incidence normale



- La LED blanche est placée à l'entrée du collimateur. Son alimentation est réalisée avec une pile de 9V ou une alimentation de tension continue réglée sur 9 V.
- La bague de réglage du collimateur est réglée de sorte que le faisceau de sortie soit quasi parallèle. Ne pas toucher à l'adhésif de blocage mis en place.



- Veiller au bon alignement du collimateur et du filtre
- Veiller à la perpendicularité du filtre interférentiel en agissant sur ses réglages.
- En utilisant les vis (2) et (3), prérégler la lecture à la valeur 0° lorsque le filtre est bien perpendiculaire.

A6.4- Etude du filtre interférentiel en incidence oblique (cf. 2.2-)

- Faire les réglages de rotation en privilégiant des valeurs entières simples [A6.2]
- Veiller au bon alignement du collimateur et du filtre en retouchant la vis de translation (1) au fur et à mesure de la rotation du filtre. Le faisceau issu du collimateur doit rester centré sur la surface apparente présenté par le filtre en biais.



TP6

SPECTROMETRIE

PRESENTATION	1		
0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP	1		
1- FONCTIONNEMENT D'UN SPECTROMETRE COMPACT A CCD	2		
2- CARACTERISATION D'UN FILTRE INTERFERENTIEL Utilisation du filtre interférentiel JAUNE sous incidence NORMALE	4		
3- CARACTERISATION D'UN FILTRE INTERFERENTIEL Utilisation du filtre interférentiel JAUNE sous incidence OBLIQUE.....	5		
ANNEXES	7		
ANNEXE A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE.....	7		
ANNEXE A2- : LOGICIEL B&WSPEC 3.26	8		
ANNEXE A3- : TABLE DE LONGUEURS D'ONDES DE REFERENCES	11		
<table border="1" data-bbox="443 1464 1161 1514"><tr><td>SONY</td><td>ILX511</td></tr></table>	SONY	ILX511	
SONY	ILX511		
ANNEXE A4- : 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W)	12		
ANNEXE A5- : CARACTERISATION D'UN FILTRE INTERFERENTIEL.....	13		
ANNEXE A6- : POSITIONNEMENT ET USAGE DU MATERIEL.....	16		

Ouvrir une session sur l'ordinateur :

Utilisateur : **etmp**
Mot de passe : **mesures**